

Les creusements en génie civil de l'antiquité à la poudre

■ Paul COURBON

Au sommet de la crête de la montagne Sainte-Victoire, la brèche creusée à l'explosif par les moines avant 1660.

Quand on va d'Aubagne à Aix-en-Provence, on ne peut manquer d'admirer le vaste élan minéral de Sainte-Victoire. Le mur calcaire vertical qui barre l'horizon fait partie des grands paysages de la Provence. En regardant bien la crête, côté ouest, on peut distinguer une indentation appelée la Brèche des Moines (figure). Juste au nord de la brèche, non visible de la route, a été bâti au XVII^e siècle le beau Prieuré de Sainte-Victoire. Il était en bien piètre état lorsque vers 1960 fut fondée l'association les Amis de Sainte-Victoire qui se donnait pour but de restaurer et sauvegarder ce patrimoine exceptionnel [11]. En 2010, je leur proposais de combler une lacune de leur travail en établissant un plan détaillé du prieuré et de ses abords. Lors des levers, je notais dans la brèche les nombreux trous de barre à mine effectués lors de son creusement. Cette observation se confirmait lorsque je relevais deux grottes s'ouvrant juste en dessous, 15 m plus bas dans la falaise. Une jonction avait été tentée entre ces deux grottes, matérialisée par de nombreux trous de barre à mine. Dans les archives du prieuré, Jean Aubert son fondateur notait : j'entrepris l'ouverture d'une belle caverne dans le rocher pour le « dessain » d'une chapelle. En 1654, un généreux donateur lui permettant de bâtir une chapelle plus vaste en surface, le creusement fut abandonné. Dans deux autres cavernes de la région, aménagées anciennement en chapelle, j'avais déjà noté d'autres trous de barre à mine correspondant à un élargissement des lieux en utilisant la poudre. Là aussi, les recherches historiques me ramenèrent au milieu du XVII^e siècle, mais aucune recherche n'aboutit en ce qui concerne l'historique des premiers creusements à la poudre. Mes investigations sur la poudre me menèrent au XIV^e siècle, avec l'envie d'en savoir plus. Alors, mon intérêt pour le creusement de la roche grandissant, en particulier lors des travaux souterrains, je remontais jusqu'aux origines.

L'antiquité et le tunnel de Samos

Dans son remarquable ouvrage, *Sciences géographiques dans l'Antiquité* [6], Raymond D'Hollander nous a donné de nombreux détails sur les plus anciens travaux de génie civil. Il cite l'aqueduc souterrain de 1 km de long qui alimentait Mycènes en eau et fut creusé entre 1.200 et 1.400 avant J.-C. Il cite aussi, à la même époque, les galeries creusées dans le roc pour assécher les marais de Thèbes. Divers puits avaient été creusés, pour l'évacuation des matériaux, mais aussi, pour suivre en surface la direction du creusement de cette galerie.

Nous étions à l'Âge du Bronze, à l'époque où étaient sculptés les spectaculaires obélisques égyptiens. Si les différents auteurs se sont surtout consacrés au levage et au transport de ces monolithes, ils ne sont entrés que depuis peu dans la technique de leur taille. Les recherches faites récemment

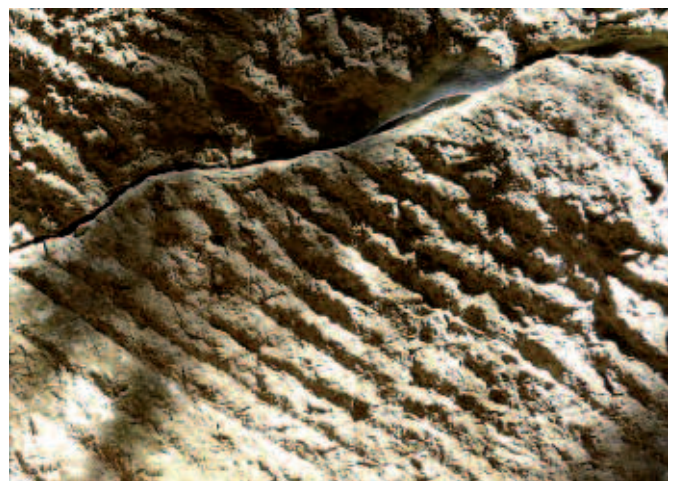


Figure 1. Creusement de la roche à la pointerolle dans l'aqueduc romain de Fréjus (Var). Mais nous étions à l'Âge du Fer.

► s'orientent vers des outils de taille en pierre dure telle que l'obsidienne, la diorite, mais surtout la dolérite et le silex ; on cite aussi le chauffage de la roche dure, puis son refroidissement brutal pour la faire éclater. Cette technique de chauffage fut employée en Norvège jusqu'au XIX^e siècle. On utilisait encore des coins de bois dur qui, gonflés d'humidité faisaient éclater des écailles de roche. Par contre, le bronze ou certains alliages de cuivre pouvaient être employés pour la taille de calcaires plus tendres. En l'absence de fer acieré, les spécialistes pensent que, même effectuées à grande échelle, les premières extractions devaient beaucoup aux techniques préhistoriques [3]. Faute de l'avoir visité, je ne sais si le calcaire du tunnel de Mycènes était très dur. Qu'importe, même en y passant un temps énorme, les hommes de l'Âge du Bronze savaient creuser la pierre ! Il faut préciser qu'au début de l'Âge du Fer qui suivit, le fer trop mou ne rendait pas de meilleurs services que le bronze ou le cuivre. Il fallut arriver environ huit siècles avant notre ère, pour voir apparaître en Asie Mineure la fabrication des premiers fers acierés assez durs (figure 1).

Le premier exemple remarquable de tunnel réalisé avec les nouveaux outils acierés est celui d'Ezéchias, ou de Siloé (Siloam), creusé sous Jérusalem dans du calcaire turonien, vers 700 ans av. J.-C. Il part de la source de Gihon (aujourd'hui de la Vierge), où l'officier britannique Warren avait découvert d'autres galeries, sans doute naturelles. Le tunnel s'enfonce en pente très douce sous la vieille ville pour atteindre la piscine de Siloé. Sa largeur est souvent limitée à 0,6 m et sa hauteur entre 1,3 et 1,8 m, sauf aux deux extrémités où elle atteint 5 m. On peut le parcourir les pieds dans l'eau (figure 2). Une plaque commémorative d'époque, transférée par les Turcs dans un musée d'Istanbul, relate en Hébreu le jour mémorable où les foreurs partis des deux côtés se sont rejoints. L'ancienneté du tunnel, cité dans la Bible, a été confirmée par une datation au carbone 14, complétée d'une datation des coulées de calcite trouvées dans la voûte et sur les parois. Les dates obtenues s'accordent entre elles, corres-



Figure 2. Le tunnel est taillé à la pointerolle et la massette, il a 1,5 m de haut pour 0,6 de large. Les coulées de calcite, visible, ont permis sa datation. Correspond-il à l'élargissement d'un conduit plus étroit ?

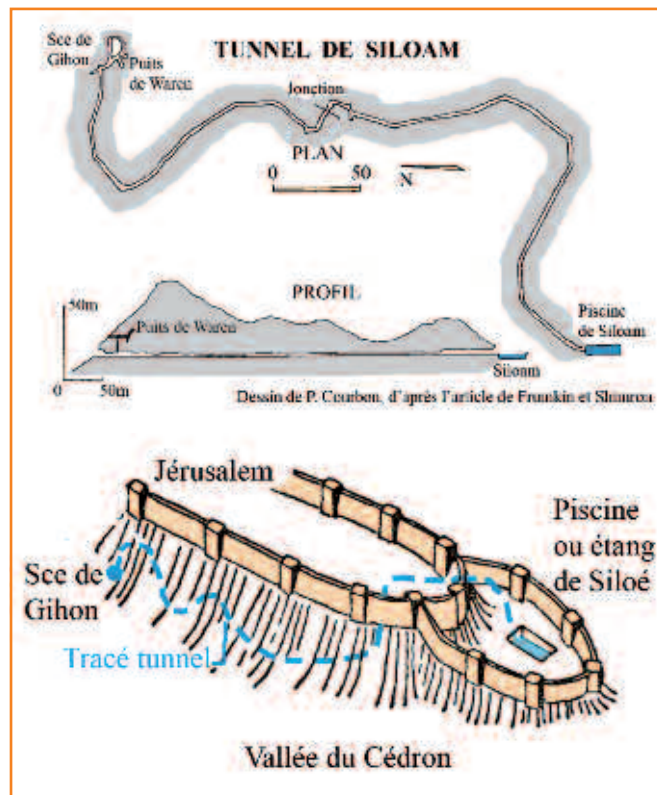


Figure 3. Sans théodolite, ni boussole, ni trigonométrie, difficile de concevoir un creusement simultané et tortueux à partir de l'étang de Siloé et de la source de Gihon. Le tunnel a la forme classique d'une cavité naturelle avec ses directions privilégiées.

pondant au règne d'Ezéchias, entre 716 et 687 av. J.-C., et au siège de Jérusalem par les Assyriens.

Cette liaison est d'autant plus étonnante que le tunnel, long de 530 m a un tracé tarabiscoté et que la distance en ligne droite entre ses deux extrémités n'est que de 320 m (figure 3). Parmi les hypothèses émises, la plus vraisemblable concerne l'agrandissement d'un étroit conduit naturel fossile, ou la succession de petites fractures qui ont guidé le creusement. On ne voit pas, en effet, pourquoi forer 530 m alors que 320 suffisaient et on imagine mal comment diriger avec précision deux creusements aussi tourmentés avec les moyens topographiques de l'époque. Aucun puits directionnel n'a été retrouvé et la jonction entre les deux équipes reste un problème. Une étude faite en 2005 [9], et qui paraît très sérieuse au vu des moyens scientifiques mis en œuvre, rejette la thèse de l'élargissement d'un conduit naturel. Elle donne l'hypothèse d'un guidage acoustique à partir de la surface ! Ayant participé moi-même à plusieurs désobstructions à la massette et à la pointerolle, ou à l'explosif dans des cavités naturelles, je reste très dubitatif. D'autant plus que le tunnel est parfois 45 m sous la surface du sol. Indépendamment de la précision directionnelle du son qui pourrait parvenir, il faut savoir que l'intensité des ondes traversant le rocher diminue proportionnellement au cube de la distance...

Moins contestable est l'histoire du tunnel de 1 265 m de long et d'une section moyenne de 1,7 m par 1,7 m, creusé pour alimenter Samos en eau, environ 550 ans av. J.-C.

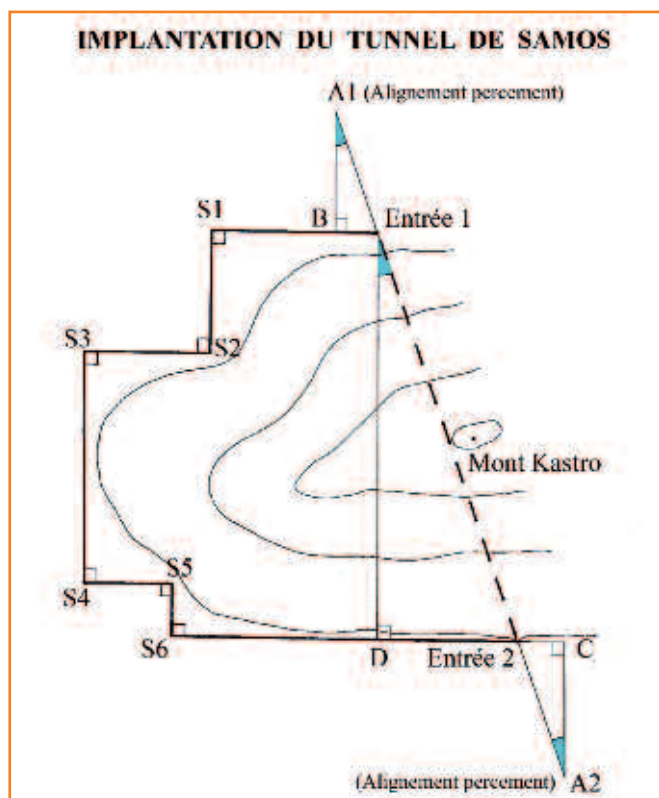


Figure 4. Hypothèse d'implantation à la groma d'après l'ouvrage *Vermessungsgeschichte, Dortmund*. La construction de deux triangles semblables en E1 et E2 permet d'obtenir l'orientation du tunnel.

Pour protéger de ses ennemis l'aqueduc alimentant la ville, Polycrate fit creuser un tunnel sous le Mont Kastro. Le travail fut confié à Eupalinos de Mégare. Là aussi, le creusement du tunnel se fit simultanément à partir de ses deux extrémités. Hérodote rapporte l'existence de ce tunnel au V^e siècle avant J.-C., mais sans entrer dans les détails techniques. Le tunnel fut découvert en 1853 par Victor Guérin et son lever topographique fut effectué en 1882 par l'Allemand Ernst Fabricius.

Raymond D'Hollander [6] se réfère à une hypothèse d'opérations topographiques faites à la groma, par portées rectangulaires (figure 5) pour assurer la jonction planimétrique des deux orifices (figure 4 d'après *Vermessungsgeschichte, Dortmund*). L'une des deux galeries de creusement a un tracé rectiligne, ne s'écartant pas de plus de 1,5 m de l'axe théorique. Ce n'est pas le cas de la seconde où l'écart atteint 3,5 m. Mais alors qu'il ne restait plus que 60 m à percer, la galerie prend un tracé en zigzag assez marqué ; on ne sait si cette anomalie est due à un mauvais repérage au son ou à la peur de rater l'autre galerie. Il est certain qu'avec une groma ne donnant que des alignements ou des angles droits, la perte d'un alignement visuel posait de gros problèmes. Quant au nivellement, on ne sait s'il fut fait en contournant la montagne ou en passant par le relief du Mont Kastro. Depuis chaque entrée, les pentes de la galerie en vue d'une jonction sont correctes : + et - 0,7 %. Pourtant, au cours de son lever, Fabricius a décelé des ondulations de 1 m d'amplitude qui se répercutent à la jonction des galeries aval

et amont où une rupture de pente de 2 m est décelée. Ces ruptures de pentes préjudiciables à l'écoulement de l'eau furent contournées par le creusement d'un canal latéral contre une paroi de la galerie.

Par la suite, seul le tunnel de l'aqueduc de Bougie, aujourd'hui Bejaïa (Algérie), creusé en 148 de notre ère, fut entrepris par ses deux extrémités, mais les galeries ne se rejoignirent pas et il fallut creuser une galerie transversale pour joindre les deux sections [2].

Le plus long tunnel de cette époque est celui de Claudius, creusé entre 41 et 52 de notre ère pour évacuer l'eau d'une partie du Lac Fucin, à 80 km de Rome. Il mesure entre 5 et 6 km selon les sources. Une quarantaine de puits furent creusés pour guider son percement à l'aide de deux lourds fils à plomb indiquant la direction à suivre (K. Peters, [5]). C'était la technique la plus couramment utilisée. D'autres tunnels furent construits au Moyen Âge, mais en moins grand nombre que sous l'Empire romain.

■ Les instruments topographiques

Dans l'ouvrage *Sciences géographiques dans l'Antiquité*, Raymond D'Hollander, François Favory [7], Anne Roth Congès [8] et Jean-Luc Besançon [2], exposent le détail des opérations topographiques, nous décrivant, entre autres, les appareils topographiques utilisés à cette époque.

Mesure des longueurs. Bien qu'ils utilisent des lattes, barres de bois ou de métal de 10 pieds (3,09 m), les Grecs préféraient utiliser des cordeaux de 50 ou 100 pieds. Par contre, les Romains préféraient utiliser des perches en bois de 10 pieds (2,96 m cette fois !) avec des graduations permettant de faire

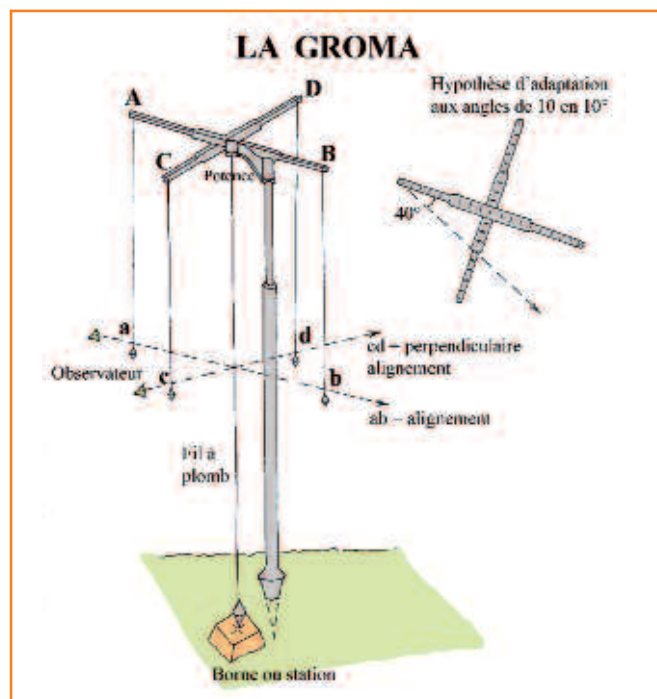


Figure 5. La groma était employée pour le cadastre et la détermination de parcelles rectangulaires. Faute d'autres instruments topographiques, son emploi s'élargit vraisemblablement à d'autres utilisations.

LE CHOROBATE

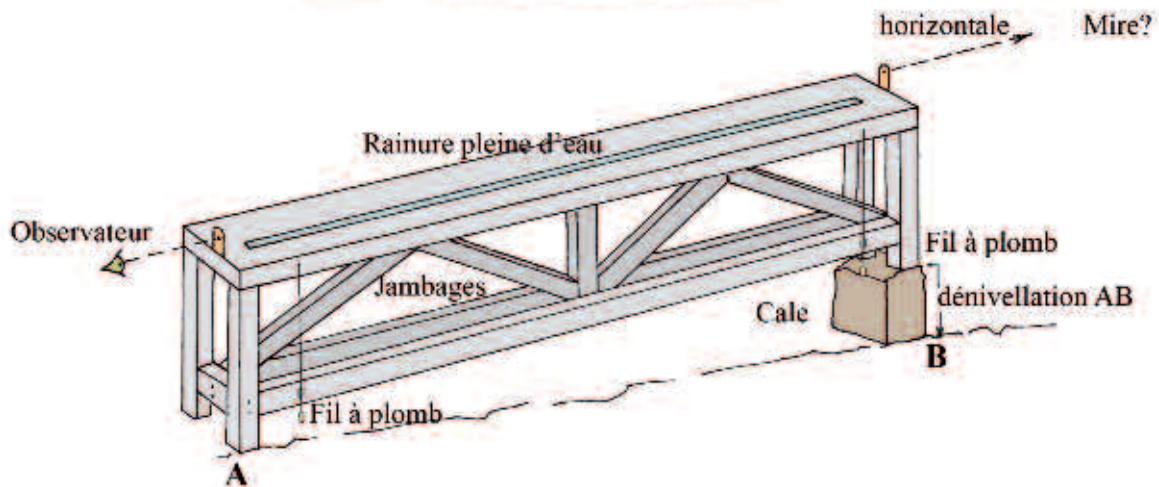


Figure 6

les apponts. Evidemment, dans les terrains en pente, les uns et les autres pratiquaient la cultellation, telle que nous l'avons apprise avant l'arrivée des distancemètres électroniques !

La groma ou gruma dont le nom serait une déformation du grec gnomon signifiant mesure à prendre. C'était une perche verticale, supportant à son extrémité supérieure une potence qui permettait d'excentrer un croisillon tournant dans le plan horizontal. Les quatre bras du croisillon, rigoureusement perpendiculaires, portaient à chaque extrémité un fil à plomb, dont l'alignement deux à deux permettait de matérialiser une direction et sa perpendiculaire (figure 5). Plus tard, la groma connut une variante permettant d'obtenir d'autres directions que l'alignement ou la perpendiculaire.

Nivellement. Trois appareils étaient utilisés pour le nivellement : le niveau à perpendiculaire hérité des Egyptiens, le chorobate et le niveau à eau.

Le *niveau à perpendiculaire* permettait de déterminer l'horizontale grâce à un fil à plomb à amener en face d'un repère.

On pouvait ainsi assurer l'horizontalité de la base de l'instrument en forme de A où était fixé le fil à plomb.

Le *chorobate* était constitué d'une règle de 20 pieds (6 m environ) reposant sur quatre pieds identiques où de courts fils à plomb permettaient de dégrossir l'horizontalité de la règle. Une rainure R remplie d'eau permettait d'affiner l'horizontalité de cette règle (figure 6), des cales étant disposées sous les pieds pour matérialiser cette horizontalité. Le nivellement s'effectuait en déplaçant le chorobate de cale en cale dont on mesurait la hauteur.

Le *niveau à eau*, hérité des Egyptiens, comportait un flotteur placé dans une bassine pleine d'eau. Sur le flotteur était disposée une alidade permettant de déterminer l'horizontalité.

Bien qu'elle ait pu être utilisée antérieurement, une mire d'une hauteur de 4,6 m de haut semble avoir été introduite vers le début de notre ère par Héron d'Alexandrie. Mais, faute de lunette grossissante, la portée devait être restreinte. Le même géomètre imagina un niveau plus maniable que le chorobate, constitué d'un tube de cuivre de 1,80 m de long rempli d'eau, recourbé aux deux extrémités. On lui doit aussi la première approche du théodolite. La visée se faisant avec une alidade associée à un demi-cercle gradué pour la mesure des angles verticaux et un cercle gradué complet pour les angles horizontaux. Il faudra attendre le début du XVII^e siècle pour voir apparaître les premières lunettes associées au premier théodolite !

On est étonné par les précisions obtenues avec ces instruments primitifs. L'exemple le plus caractéristique concerne l'aqueduc alimentant Nîmes en eau depuis Uzès et passant par le Pont du Gard (figure 7). Il fut creusé au I^{er} siècle de notre ère. Après maints détours dans les collines souvent coupées de ravines, l'aqueduc mesure 50 km, alors que 20 km à vol d'oiseau séparent Nîmes et Uzès. La dénivellation totale est inférieure à 15 m. Cela induit la topographie précise d'une vaste zone. Pour abaisser de 5 m la hauteur de l'aqueduc franchissant le Gardon, la pente en amont du Pont du Gard est de 67 cm/km et en aval de 19 cm/km [2]. Cela nous laisse admiratifs.



Figure 7. Dominant le Gardon de 49 m aux basses eaux, le Pont du Gard est le plus haut aqueduc romain. La détermination précise des pentes différentes en amont et en aval de l'aqueduc permet d'abaisser sa hauteur de 5 m.

Un saut à Sainte-Victoire

Il semble que durant un millénaire et demi, les techniques de creusement, tout comme celles de la topographie, aient peu évolué. Cela permet de faire sans encombre un saut de seize siècles pour aller à Sainte-Victoire.

Les trous ou empreintes de barre à mine (ou encore fleuret), d'un diamètre proche de 50 mm et d'une profondeur de 50 à 60 cm montrent sans ambiguïté l'usage de la poudre (figure 8 et 9). Les trous dans lesquels, jusqu'à une époque peu lointaine, on introduisait un coin de bois dur que l'on mouillait pour faire éclater des écailles de roche n'avaient ni cette profondeur, ni cette forme. Les empreintes retrouvées dans



Figure 8. Trou de barre à mine pour le creusement de la Brèche des Moines. Il n'a rien à voir avec un trou pour coin de bois mouillé.

les deux cavités, restées inaccessibles pendant près de deux siècles par suite d'un effondrement (figure 11), datent bien des années 1651-53. Les empreintes de la brèche (figure 8) sont juste postérieures à 1654. Non loin de là, à la chapelle souterraine de Notre-Dame des Anges, dans le massif de l'Etoile, les traces de barre à mine que j'ai notées lors du lever de la cavité, correspondent à un élargissement mentionné dans un prixfaict (devis) de 1641 [12]. Toujours lors d'un lever, je trouvais d'autres traces de barre à mine dans la grotte de Saint-Eucher (Vaucluse) dont une salle avait été aménagée en chapelle au XVII^e siècle. Il était intéressant de rechercher à partir de quand la poudre avait été employée dans le génie civil. Mais la plupart des auteurs se sont atta-

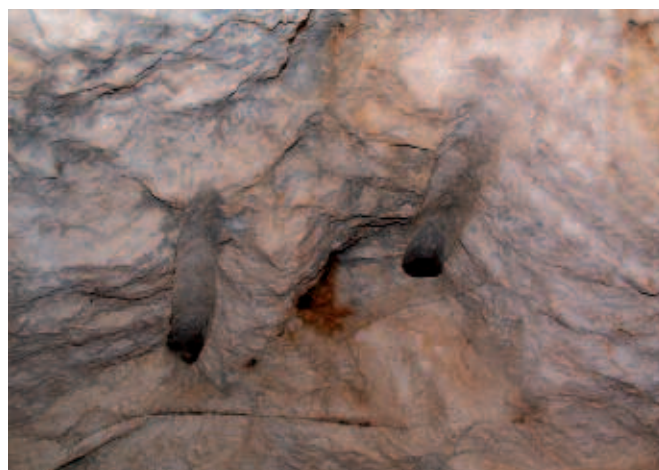


Figure 9. Trous de barre à mine dans la grotte

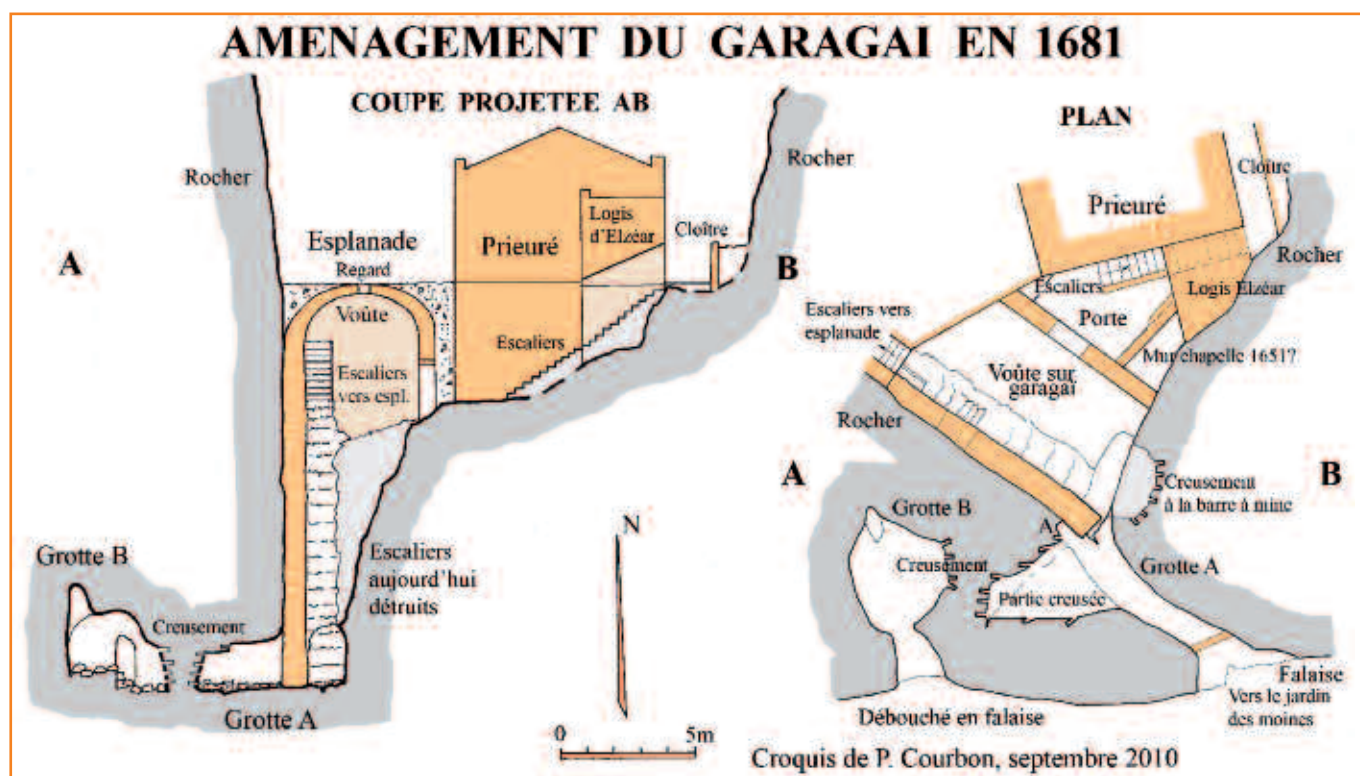


Figure 10. Topographie et trous de barre à mine montrant la tentative de jonction entre les deux grottes rendues inaccessibles pendant près de deux siècles et jusqu'en 2008, par l'effondrement de la voûte sur le garagai.



Figure 11. Traces de l'obstruction du garagäi, nettoyé en 2006-2008, près de deux siècles après l'effondrement.

► chés à l'aspect militaire de la poudre, beaucoup plus excitant ! En France, les publications très récentes [4 et 10] concernant l'emploi de la poudre dans le génie civil sont dues à la Société d'Etude et de Sauvegarde des Anciennes Mines (SESAM) dans les Vosges, à Francis Pierre et à l'INRAP.

Recherches à la Traversette

Pour confirmer et mieux cerner le début de l'usage de la poudre en génie civil, j'ai voulu voir le Tunnel de la Traversette creusé entre la vallée du Guil (Queyras) et Crissolo dans la vallée du Pô. Michel Marec, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées, directeur du Centre d'Etudes des Tunnels (Cétu), me l'avait signalé comme étant le plus ancien tunnel franchissant une crête des Alpes. Il fut creusé entre 1479 et 1480 sous les ordres du Marquis de Saluces (Saluzzo en Italien). La poudre étant connue à cette époque, il devenait intéressant de voir si on y retrouvait des empreintes de fleuret.

Il a beaucoup été écrit sur le tunnel de la Traversette. Aux embellissements de l'histoire s'est ajouté tout l'imaginaire colporté par les conteurs le soir à la chandelle et qui a fini par être écrit. On apprend ainsi qu'en 1494 Charles VIII l'utilisa pour son expédition en Italie, puis qu'en 1499, Louis XII conquiert le Milanais en passant par ce tunnel. On peut lire encore qu'en 1515, date que tous les écoliers français associent à la bataille de Marignan, François I^{er} fit réparer le tunnel et les routes (sic) permettant d'y accéder ! Le même François I^{er} y serait repassé en 1525 avec son artillerie...



Figure 12. L'entrée du tunnel côté italien. Il a été creusé à la faveur d'une fracture facilitant le travail de la roche.

Mais, quand on a visité le site, on voit très mal une armée, ses chevaux et charrettes emprunter l'étroit sentier muletier de montagne, puis le tunnel. On se pose alors beaucoup de questions. La première question concerne la difficulté d'accès au tunnel due à son altitude : 2900 m et à l'enneigement qui en résulte. Aujourd'hui, il peut être accessible sans skis quatre mois par an, et encore ! Le 17 juillet 2011, après un hiver et un printemps peu neigeux, son orifice côté français était presque entièrement obstrué par un névé. Or, il ne faut pas oublier que du Moyen Âge jusqu'à la moitié du XIX^e siècle, nous avons connu un mini âge glaciaire avec un climat hivernal beaucoup plus rigoureux qu'aujourd'hui. Pourquoi passer ici, alors qu'il ne manquait pas de passages moins hauts et plus accessibles dans ce même massif, tel le Col Lacroix (2299 m), situé 9 km au nord-ouest. Était-ce à cause de la volonté du Marquis de Saluces d'avoir un passage propre et de pouvoir faire passer le sel en évitant de payer des redevances au franchissement d'un col plus facile ? Un intéressant article de Claudine Fouque, écrit en 2008 pour Alpes et Midi figure sur Internet sous le titre *"Le tunnel de la Traversette, une route de contrebande"*. A une époque, cela lui valut le nom de Tunnel du sel. Les contrebandiers circulaient souvent à pied avec des charges pouvant atteindre 50 kg. Leur trafic dura jusqu'au milieu du XX^e siècle, le sel ayant été remplacé par les cigarettes ou autres produits.

Une anomalie concerne la hauteur inégale du tunnel. Elle est souvent supérieure à 2 m, sauf sur un très court passage où il faut se courber pour passer sous un redan de la voûte rocheuse, qui s'abaisse entre 1,3 et 1,4 m de hauteur. Cet abaissement était certainement un obstacle pour un mulet chargé, encore plus pour un cheval. Pourtant, il aurait suffi de peu de travail pour le faire sauter. A première vue, il ne s'agirait pas du glissement d'un bloc issu du plafond, ce qui m'a amené à penser : *"Le tunnel a-t-il été inachevé, son peu d'utilité apparaissant au cours de sa construction ? Ou encore inachevé faute de paiement ?"*

D'après le profil exécuté en 1996 pour le Rotary de Saluzzo (figure 13) et affiché près de l'entrée italienne, le tunnel mesure un peu moins de 55 m de long et sa hauteur inégale varie de 3 m à 1,4 m.

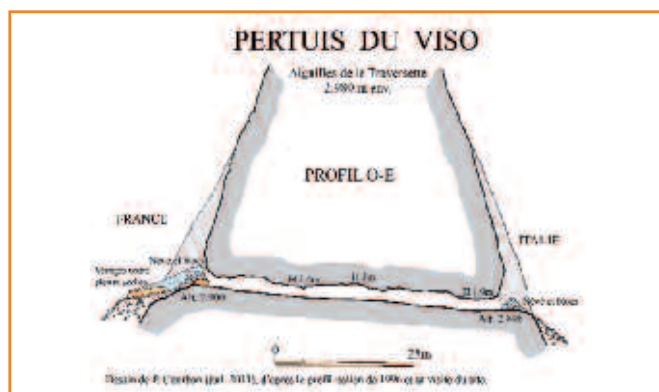


Figure 13. Coupe du tunnel de la Traversette ou Pertuis du Viso, figurant sur le panneau du côté italien.

Je ne pense pas qu'il y ait eu percement simultané à partir des deux orifices, cela aurait sans nul doute nécessité une polygonale pour joindre les deux orifices et déterminer la direction des creusements. Vu le relief très escarpé et les moyens topographiques de l'époque, cela est peu probable. De plus, il n'y a aucun endroit d'où l'on puisse voir en même temps les deux orifices. Autre élément : si on comprend très bien le choix de l'entrée côté italien, on voit qu'il n'y a pas eu de choix du côté français où l'orifice aboutit dans une zone éboulue et sous un névé permanent qui devait certainement être plus important en 1479, étant donnée la rigueur du climat mentionnée précédemment.

Côté italien, l'entrée se trouve à la base de la falaise, dans un renfoncement de la paroi qui correspond à une zone de fracturation (figure 12). Cette zone de fracturation était donc plus favorable à un travail à la masse, à la massette et à la pointerolle qu'une zone de roche massive et homogène. Ce travail en zone fracturée explique le profil irrégulier de la galerie où les blocs de rocher ont été détachés et extraits en fonction de la fissuration existante. On a des zones plus ou moins larges et plus ou moins hautes. Observation très importante : je n'ai pu trouver aucune trace de fleuret dans le tunnel. Le creusement à la pointerolle et à la massette utilisé ici est confirmé par l'usage de ces outils dans les mines des Vosges durant tout le XVI^e siècle [10].

Petite histoire de la poudre

Bien que cette version ne fasse pas l'unanimité, la poudre aurait été inventée en Chine au VII^e siècle par le médecin alchimiste *Sun Simiao* qui obtint un mélange explosif en recherchant un élixir d'immortalité ! S'il n'a pas découvert l'élixir, cette invention lui a quand même donné l'immortalité ! *Sun Simiao* explique qu'on obtient une combustion violente en mettant le feu à un mélange de sulfures, de charbon de bois et de salpêtre. Mais, on ne pensera à en utiliser la force explosive que beaucoup plus tard.

Les techniques de fabrication auraient été transmises au monde arabo-perse au VIII^e ou au IX^e siècle d'où elles seraient arrivées à l'Occident au milieu du XIII^e siècle. *Marco Polo* (1254-1324) les ramena lui aussi, lors de son arrivée à

Venise, en 1295, au retour de son voyage en Extrême-Orient. Cette poudre ne tarda pas à être utilisée pour la guerre. En Europe, les premières armes à feu apparaissent en 1326 et, bien qu'ils n'aient eu qu'un rôle très secondaire, l'histoire nous apprend que les premiers modèles de canons furent utilisés en 1346 à la bataille de Crécy.

Aux XIV^e et XV^e siècles, la composition de la poudre était de 6 masses de salpêtre pour une masse de soufre et une masse de charbon de bois. Mais ultérieurement, on trouve des compositions variables selon les usages, en évitant des mélanges trop brisants qui faisaient exploser les canons ! Le salpêtre constitue le comburant qui libère de l'oxygène au cours de la réaction, venant oxyder les combustibles constitués par le soufre et le carbone. Cette propriété de comburant du salpêtre avait déjà été utilisée par les Grecs au VII^e siècle dans leurs feux grégeois.

La poudre et le génie civil

On a en mémoire les sapes entreprises à la fin du Moyen Âge pour faire sauter les fortifications que l'on assiégeait. En fait, on disposait au fond de la sape un baril de poudre que l'on faisait exploser, sans doute en utilisant la *mèche incendiaire* employée pour la mise à feu des mousquets. Mais, c'était un usage très limité ne pouvant être utilisé dans les carrières ou les mines.

La possibilité de l'usage de la poudre dans les carrières et mines amena la mise au point d'autres techniques. Comment sont-elles apparues ? Étaient-elles le fruit de multiples tâtonnements pour transposer à la poudre la méthode d'éclatement de la roche par un coin de bois dur mouillé ? Venaient-elles de l'idée de génie d'un artilleur, inspiré par l'explosion de canons ? Dans ce cas, il n'y avait pas de boulet à tirer, mais il fallait penser à faire exploser l'âme du canon constituée par le trou de barre à mine dans la roche encaissante ! Différemment de Bickford ou de Nobel, le nom de l'inventeur n'est pas passé à la postérité et aucune date certaine ne peut être avancée !

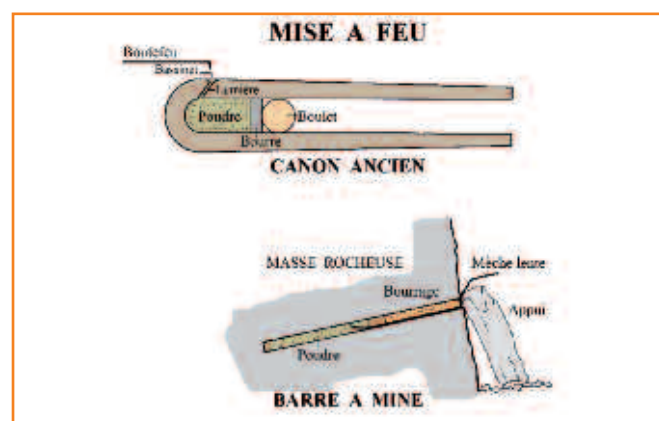


Figure 14. Dans le canon, la lumière est assez grande pour que la poudre fine (pulvérine) qu'elle contient transmette le feu à la poudre dont l'explosion va éjecter le boulet à grande vitesse. Dans un trou de barre à mine, seule la mèche lente va permettre à la flamme de traverser le solide bourrage pour atteindre la poudre dont l'explosion va fendre ou briser la roche environnante.

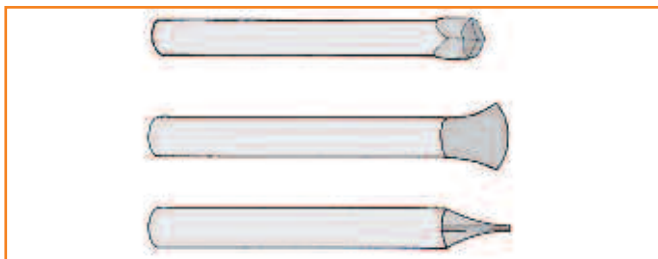


Figure 15. Fleur de canon en bonnet d'évêque employé dans les Vosges et fleur de canon à tête évasée. Il n'ont le trou central pour l'air comprimé des barres à mine modernes.



■ Gestation d'une invention

Cette gestation nécessitait la combinaison de plusieurs éléments. Pour passer du trou pour coin de bois à un trou plus profond, semblable à l'âme d'un canon, il fallait imaginer le fleur de canon ; nous ne savons de quand datent les premiers spécimens de cet outil (figure 15). Le trou de fleur de canon creusé, il était à moitié rempli de poudre, puis colmaté avec une solide bourre d'argile que l'on pouvait caler avec un rocher ; en guise de bourre Francis Pierre cite un calage avec une cheville de bois comportant un méplat pour le passage de la mise à feu (figure 14). Il fallait encore imaginer ce système de mise à feu.

■ La mise à feu

Au XVII^e siècle, à l'arrière des canons, un petit orifice appelé lumière rejoignait l'âme où se trouvaient la gargousse de poudre, la bourre et le boulet. Cet orifice, alimenté par l'entonnoir du bassinet, était d'un diamètre suffisant (2 lignes et 6 points, soit environ 5 mm) pour que la poudre fine (pulvérisée) qu'on y versait, transmette jusqu'à l'âme du canon, la flamme donnée extérieurement par le boutefeu du canonier. Rappelons que le pied (autour de 30 cm selon les pieds) se divisait en 12 lignes et la ligne en 12 points. Dans les mousquets, la mèche incendiaire remplaçait le boutefeu. Différemment de la lumière des canons, proche de la verticale, notre trou de barre à mine pouvait être horizontal. Dans ce cas, difficile pour la pulvérisée de s'écouler dans le petit conduit de mise à feu qu'on aurait pu aménager dans le bourrage, avec la fine tige d'un roseau par exemple, d'autant plus qu'ici, il n'y avait pas de bassinet. Il fallait imaginer un autre système : une mèche lente ou son équivalent. C'est-à-dire une mèche comportant un comburant lui permettant, comme la poudre, de brûler dans un espace confiné et sans oxygène, mais à une vitesse beaucoup plus lente pour laisser au carrier le temps de se mettre à l'abri. Les mèches incendiaires, employées pour la mise à feu des mousquets, se consumaient très lentement (6 pouces, soit 15 cm/heure), mais c'était à l'air libre. Le salpêtre pouvant servir de comburant, comme dans la poudre, on peut imaginer qu'un cordeau trempé dans une solution contenant du salpêtre, puis séché aurait pu brûler en milieu confiné.

Les spécialistes sont partagés et le flou subsiste concernant ces premiers systèmes de mise à feu associés aux barres à mines, sans doute très éloignés des mèches lentes de sécurité modernes apparues avec Bickford en 1831. La date de 1613 avait été avancée pour ce premier type d'utilisation,

dans les mines de Freiberg (Saxe), mais sans éléments de preuve d'après Francis Pierre.

On trouve une vaste répartition géographique des autres anciens sites connus. Dans les mines de Thillot (Vosges), les archives ont révélé des comptes de 1617 faisant état d'achat de poudre noire : *Poudre fournie pour tirer dans la montagne et faire sauter la roche* [10]. Cela a été confirmé par la datation d'une galerie creusée à la barre à mine et estimée antérieure à 1620. Dans les mines de fer de Farinole (Corse), exploitées par les Génois, on aurait trouvé des traces de "forure", datant de 1621 et dans les mines de Slovaquie (Banska Stiavnica), l'usage de la poudre remonterait à 1627 [10]. Ces dates, échelonnées de 1613 à 1627, sont cohérentes entre elles. Elles confirment surtout la possibilité de l'utilisation de la poudre à Sainte-Victoire et dans les cavités provençales citées précédemment. Accusée souvent d'obscurantisme, l'Eglise savait parfois être à la pointe du progrès !

La poudre en génie civil moderne

Hors les galeries de mines, on ne trouve pas beaucoup de percements de tunnels dans les deux siècles suivant l'arrivée de la poudre. Il est intéressant de citer les tunnels pour péniches. En France, durant l'hiver 1679-1680, le tunnel de Malpas, sur le trajet du canal du Midi, fut le premier creusé à la poudre ; il est long de 170 m. Plus important est le tunnel du canal de Bourgogne qui permet de joindre le bassin de la Seine à celui du Rhône. Long de 3 333 m, il fut creusé de 1775 à 1782. L'idée d'un canal joignant la rade de Marseille au Rhône par l'intérieur des terres date du XVII^e siècle. Mais, le tunnel du Rove, long de plus de 7 km et passant sous la chaîne de l'Estaque pour rejoindre l'Etang de Berre, ne fut creusé qu'au début du XX^e siècle ! Il a été fermé par un éboulement en 1963.

Il faut attendre le XIX^e siècle pour voir un usage de la poudre à grande échelle dans le génie civil. En 1829, Samuel Colt avait été le premier à faire détonner une charge sous l'action du courant électrique. En 1831, William Bickford avait inventé une mèche lente de sécurité pour les mines, connue sous le nom de *cordeau Bickford*. De nouveaux explosifs dits "brisants" (Vitesse de propagation de l'onde d'explosion plus rapide), dont la nitroglycérine (1847), puis la dynamite (1867), étaient apparus, nécessitant l'emploi de détonateurs pour amorcer l'explosion. Bien sûr, les explosifs trouvèrent



Figure 16. Perforatrice utilisée au tunnel de Fréjus (d'après Edward Wymper en 1873).

leur plein emploi dans les carrières, ou encore, dans des grands ouvrages de creusement comme le spectaculaire canal de Corinthe (1882-1893) ou le canal de Panama (1880-1914). Mais, revenons à nos tunnels.

Nécessités par la difficulté des trains à franchir de trop fortes pentes, les premiers grands tunnels furent ferroviaires. Le premier tunnel ferroviaire français fut celui de Terre Noire, entre Lyon et Saint-Etienne, creusé entre 1827 et 1832, mais la plupart des grands tunnels ferroviaires français furent réalisés entre 1839 et 1910. Les nouvelles techniques avec haveuses ou perforateurs n'étaient pas encore apparues et, au début, le creusement se faisait à la main. Deux hommes tenaient le fleuret (ou barre à mine), tandis qu'un troisième tapait dessus avec sa masse, attention aux doigts ! La perforatrice à air comprimé fut employée pour la première fois en 1861 (figure 16), lors du creusement du tunnel du Mont-Cenis (ou de Fréjus) qui dura de 1857 à 1871. Reliant Modane à Bardonnecchia, il était avec 13 km le plus long du monde.

Le tunnel du Lioran, dans le Cantal, est le plus ancien des grands tunnels routiers français. Sa construction dura de 1839 à 1847. D'une longueur de 1 414 m, il a été creusé à la main et à l'explosif, d'abord avec une petite galerie que l'on élargissait ensuite. Citons pour mémoire le tunnel de Wapping en Angleterre. Il ne fut pas creusé à l'explosif, mais au pic et à la pioche. Long de 400 m et passant sous la Tamise, sa construction qui dura de 1824 à 1842 rencontra de nombreuses difficultés dues en particulier à des arrivées massives d'eau. L'utilisation d'un bouclier qui suivait le creusement à chaque tranche de 0,5 m y a fait son apparition.

Avec les progrès de la technique, on vit arriver des outils de percement de plus en plus performants. D'énormes engins roulants portent des bras qui perforent les trous où sont placées ensuite les charges explosives. Les barres à mine (ou fleurets) peuvent être positionnés très précisément et plusieurs forages peuvent être réalisés simultanément.

Dans les années 1960, apparurent les boucliers automoteurs et les tunneliers. Les tunneliers sont d'énormes machines fraiseuses comportant à l'avant un plateau tournant qui attaque la zone à creuser. Les débris sont évacués par tapis roulants quand ils sont secs ou par pompage quand ils sont boueux. Le front de taille est tenu en place par la force qu'exerce le plateau tournant, et si nécessaire, par une surpression d'air, d'eau ou de boue. Enfin, un ensemble mécanique complexe permet d'amener à pied d'œuvre et de positionner exactement les voussoirs, qui permettent de construire la voûte définitive du tunnel. Ces énormes engins peuvent mesurer plus de 100 m de long et leur masse peut dépasser 1 000 tonnes.

Le tunnel du Mont-Blanc (11,6 km), mis en service en 1965, a été creusé à l'explosif avec un avancement de 7 m par jour. Il en fut de même pour le Tunnel de Seikan (53,6 km dont 23,3 sous la mer), entre les îles de Honshu et de Tokaido au Japon, où les terrains étaient trop hétérogènes pour utiliser un tunnelier. Il fut mis en service en 1988 et passe 240 m au-dessous du fond de la mer (Marec).

Par contre, au Tunnel sous la Manche (50,5 km dont 35 sous

la mer), les roches de craie étant homogènes et bien connues, il fut utilisé un tunnelier de 8,70 m de diamètre. Les cadences d'avancement plus rapides ont atteint jusqu'à 51 mètres en une journée. Il ne passe qu'à 30 m au-dessous du fond de la mer. Le creusement fut commencé en 1987, la jonction eut lieu en 1990 et la mise en service en 1994.

Aujourd'hui, le nouveau tunnel ferroviaire du Saint-Gothard (le premier date de 1881) deviendra avec 57 km le plus long du monde. Son creusement a été terminé en 2011 et il devrait être mis en service en 2016. A titre de curiosité, le tunnel routier le plus long du monde actuellement mesure 24,5 km. Il se trouve en Norvège, entre Laerdal et Aurland, sur la route joignant Oslo à Bergen. La vitesse étant limitée à 70 km/h, le temps de traversée semble interminable.

Les dangers de la poudre

En dehors des risques de manipulation de l'explosif ou des mises à feu ratées, l'emploi de la poudre est rendu très dangereux par les gaz délétères dégagés au cours de l'explosion (principalement CO₂ et N₂). Aujourd'hui, de puissants dispositifs d'aération existent, mais, qu'en était-il autrefois ? Ces accidents n'ont pas été relatés et, il y a moins d'un siècle, sans règles draconiennes de l'inspection du travail, ils étaient banalisés. Les témoignages d'accident dus au gaz dont j'ai la connaissance, nous viennent de la spéléologie.

■ L'Abisso dei Morti

Au XIX^e siècle, Trieste, possession autrichienne, était le grand débouché maritime de l'empire austro-hongrois. Son alimentation en eau était vitale et fut l'un des moteurs des recherches souterraines [1]. Tout avait commencé, entre 1839 et 1840, avec l'exploration de Trebiciano par Lindner. La Recca souterraine avait été atteinte, mais la profondeur du gouffre (-322 m) et les variations de niveau de la Recca avaient empêché le pompage de l'eau. Au cours de l'exploration qui dura onze mois, plusieurs étroits passages entre les puits avaient été élargis au pic et à la massette (figure 17).

En 1860, de Rin, successeur de Lindner, avait découvert une

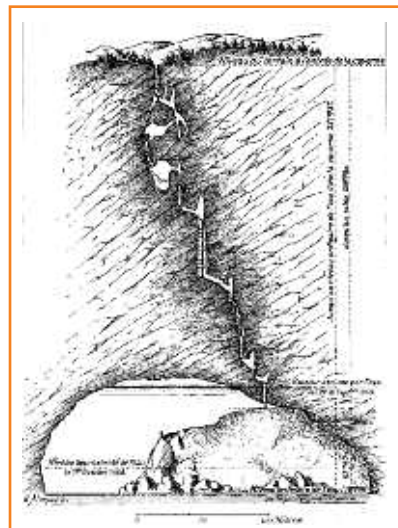


Figure 16. Le gouffre de Trebiciano, première grande désobstruction de l'histoire de la spéléologie, mais faite sans explosifs, entre 1839 et 1840. Ce fut pendant longtemps, avec la cote -322, le plus profond gouffre du monde (Les Abîmes, E. A. Martel)

▶ autre cavité qui aurait pu aboutir à la Recca souterraine. C'était un infâme méandre rocheux où les ouvriers travaillèrent pendant cinq ans pour l'élargir à la massette et au pic. Ils furent arrêtés par un rétrécissement de plusieurs mètres après lequel ils supposèrent un évasement. De Rin décida alors de faire sauter l'obstacle et une forte charge d'explosifs fut placée au rétrécissement, vraisemblablement sans avoir percé de trous dans la roche au fleuret, à cause de l'exiguïté des lieux. Le 28 octobre 1865, après qu'un fil électrique ait été déroulé jusqu'à la surface, une décharge électrique y était envoyée. Aucun bruit n'ayant été perçu, au bout de quelques heures, quatre mineurs descendirent dans la cavité pour vérifier la mise à feu. Ils n'en ressortirent jamais. Huit jours plus tard, le fils de l'un des mineurs pénétra à son tour dans le gouffre pour rechercher le cadavre de son père, il ne réapparut pas lui non plus. Environ trente ans plus tard, les spéléologues de Trieste découvraient le squelette du jeune homme à 80 m et les autres à 190 m de l'entrée. La trop forte charge de poudre avait dégagé beaucoup trop de gaz dans une cavité sans doute mal aérée. Le gouffre fut nommé *Abisso dei Morti* (*Abîme des morts*). Depuis, les spéléologues ont maîtrisé les désobstructions souterraines. Les forages de 14 mm de diamètre ou moins à la perceuse électrique, les micro-charges dégageant très peu de gaz, les détonateurs plus performants ont révolutionné la technique. Cela n'a pas évité deux accidents mortels en France durant les vingt dernières années.

Conclusion

Si l'électronique et l'informatique ont révolutionné en peu de temps de nombreuses techniques dont la topographie, en génie civil, l'arrivée de la poudre a fait faire un bond de deux millénaires aux techniques de creusement. Depuis 50 ans, les techniques de forage des tunnels ont connu une nouvelle révolution avec l'avènement des tunneliers. Durant ces 50 années, malgré l'apparition des théodolites électroniques, la topographie accompagnant ces creusements n'a pas connu de révolution significative. Seule l'arrivée du GPS a permis un positionnement rapide, avec une précision centimétrique des orifices de tunnel. Souvenez-vous encore de la fermeture enregistrée au moment de la jonction des deux équipes du tunnel sous la Manche : 35 cm en planimétrie et 5 en altimétrie après 50 km de creusement. Entre-temps, de très nombreuses mines souterraines de l'Europe ont disparu, en France en particulier. On leur a préféré les mines à ciel ouvert dans d'autres pays, beaucoup plus rentables à exploiter. Les géomètres français qui avaient reçu les cours de topographie souterraine de Robert Taton, n'ont plus le loisir de les mettre en pratique. Nos rappels historiques feront peut-être naître un peu de nostalgie chez ceux qui ont vécu tous les bouleversements du demi-siècle écoulé. ●

Remerciements

Je remercie MM. Michel Marec, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées, directeur du Centre d'Etudes des

Tunnels (Cétu), Francis Pierre, directeur des fouilles SESAM et chercheur associé à Paris 1, Xavier Pennec, Philippe Audra, Michel Wienin, Roger Serre, Bernard Fröhlich et le Général J.-P. Bariller pour les renseignements qu'ils m'ont aimablement fournis.

Bibliographies

- [1] Pierre MINVIELLE, 1967, *La conquête souterraine*, Arthaud, Paris
- [2] Jean-Luc BESANÇON, 1979, *Géomètres topographes du Bassin méditerranéen et du Moyen-Orient antiques*, Mémoire d'ingénieur ESGT. Repris pp.416-425 dans l'ouvrage D'HOLLANDER.
- [3] Jean-Claude BESSAC, 1986, *L'outillage traditionnel du tailleur de pierre de l'Antiquité à nos jours*, Paris, Ed. du CNRS, 309 p.
- [4] Francis PIERRE, 1992, *Datation des travaux miniers à la poudre, Actes du colloque sur les ressources minières et l'histoire de leur exploitation*, 113^e Congrès des sociétés savantes, Strasbourg, 5-9 avril 1988, Paris, éd. du CTHS, pp. 519-527.
- [5] Konrad PETERS, 1997, *Méthodes de mesure et d'implantation des tunnels dans l'Antiquité*, XYZ N°72, pp. 68-71.
- [6] Raymond D'HOLLANDER, 2003, *Les Sciences Géographiques dans l'Antiquité*, AFT, Paris, pp. 200-207.
- [7] François FAVORY, même ouvrage, *Histoire de l'arpentage romain*, pp. 403-406.
- [8] Anne ROTH CONGES, même ouvrage, *La "limitation" et ses techniques, une spécificité romaine*, pp. 406-415.
- [9] A. Frumkin et A. Shimron, 2006, *Tunnel engineering in the Iron Age: geoarchaeology of the Siloam Tunnel, Jérusalem*. Journal of Archaeological Science 33, pp. 227-237.
- [10] Francis PIERRE, 2008, *Etude de l'évolution des techniques d'attaque de la roche dans les mines vosgiennes, du XVI^e au XVIII^e siècle*, Archeopages 22, (dossier Mines et carrières), juillet 2008, p. 42-49, Inrap, Paris
- [11] Jean CATHALA, 2011, *Un joyau sur Sainte-Victoire*, les Amis de Sainte-Victoire, Aix-en-Provence.
- [12] Bernard DUPLESSY, 2011, *Notre-Dame-des-Anges, une solitude dans l'Etoile*, cahier 103 du Comité du Vieux Marseille.

Sur le site internet Planet TP, on peut consulter la remarquable histoire des tunnels, écrite par Michel MAREC, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées, ancien directeur du Centre d'Etude des Tunnels (CETU), à Lyon.

Contact

Paul COURBON - paul.courbon@yahoo.fr

ABSTRACT

During a surveying, the author discovered borer's holes insides caves below an old monastery of Provence. The study of the monastery archives showed that theses holes had been drilled during the middle of the XVIIth century. This discovery inclined the author to do researches about the first using of explosives in the quarries and the mines and to retrace the digging of the tunnels from the Antiquity to present-day.